

На правах рукописи

**НИКИФОРОВ Григорий Анатольевич**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ДВУХФАЗНОЙ ЖИДКОСТИ В  
НЕОДНОРОДНЫХ И СЛОИСТЫХ ПОРИСТЫХ СРЕДАХ**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Казань – 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук институте механики и машиностроения Казанского научного центра Российской академии наук.

Научный руководитель            доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН  
**Губайдуллин Дамир Анварович**

Официальные оппоненты:        доктор физико-математических наук, профессор  
**Мазо Александр Бенцианович**

доктор физико-математических наук, профессор  
**Булгакова Гузель Талгатовна**

Ведущая организация:            **Татарский научно-исследовательский и проектный институт нефти, (г. Бугульма)**

Защита состоится 24 ноября 2011 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.081.11 при Казанском (Приволжском) федеральном университете, расположенном по адресу: 420008, Казань, ул. Кремлевская, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского (Приволжского) федерального университета.

Автореферат разослан «17» октября 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета, к.ф.-м.н., доцент

**А.А. Саченков**

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность.** В природе практически не встречаются однородные водоносные, нефтяные и газосодержащие пласты. Даже керновый материал одной скважины, отнесенный к одному и тому же геологическому времени, имеет большую амплитуду значений фильтрационно-емкостных свойств. Поэтому изучение влияния неоднородности пористых сред на движение в них жидкостей и газов при разработке залежей углеводородов является актуальной проблемой. При моделировании течений в пористых телах, в которых можно не учитывать влияние давления на свойства жидкостей и пористого скелета, целесообразно использовать постановку задачи в переменных «скорость-насыщенность». Так при моделировании проникновения загрязняющей жидкости в почву при ее разливе на поверхности (например, при разливе нефтепродуктов) нет необходимости в знании поля давления в почве. Обычно нужно знать глубину проникновения загрязнения в почву и ее насыщенность загрязняющей жидкостью, линии тока загрязняющей жидкости. Поле скоростей позволяет лучше понять «устройство» течения жидкости в неоднородных пластах.

**Целью диссертационной работы является:** разработка эффективных методов решения задач двухфазной фильтрации в переменных «скорость-насыщенность» и «давление-скорость-насыщенность» с учетом капиллярных и гравитационных сил, тестирование методов на задачах путем сравнения с аналитическими решениями, с решениями другими методами и с экспериментальными данными. Исследование с помощью численного эксперимента процессов движения двухфазной жидкости в неоднородных и слоистых пористых телах.

**Научная новизна результатов.** Разработаны методы решения задач двухфазной фильтрации с учетом гравитационных и капиллярных сил в переменных «скорость-насыщенность» и в переменных «давление-скорость-насыщенность».

Численно смоделированы и показаны особенности течения при проникновении тяжелой загрязняющей жидкости в неоднородную пористую среду и после кислотной обработки или после гидроразрыва нефтяного пласта, изучены особенности перераспределения остаточных запасов нефти под действием гравитационных и капиллярных сил в слоистых пластах по окончании разработки залежи.

**Научное и практическое значение работы.** Работа носит теоретический и прикладной характер. Численно реализованы математические модели нестационарной двухфазной фильтрации в переменных «скорость-насыщенность» и в переменных «давление-скорость-насыщенность». На основе сделанных расчетов сформулированы выводы, которые могут быть использованы в области проектирования разработки нефтяных месторождений и при оценке последствий проникновения загрязняющей жидкости в почву. Данная работа может быть использована в качестве методического материала для учащихся высших учебных заведений, в котором изложен еще один подход к решению задач двухфазной фильтрации.

**Достоверность результатов.** Заложенная в основу диссертации математическая модель основана на общих законах и уравнениях механики сплошной среды и хорошо апробирована. Численный алгоритм протестирован на ряде задач. Произведено сравнение численного решения с аналитическим решением, с решением другим методом, выполнено сравнение с известными численными решениями и экспериментальными данными, полученными другими авторами. Сравнение показало удовлетворительное согласование результатов.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

Численные модели двухфазной фильтрации с учетом капиллярных и гравитационных сил в переменных «давление-скорость-насыщенность» и «скорость-насыщенность».

Выявленные закономерности и особенности перераспределения остаточных запасов нефти в слоисто-неоднородных пластах.

Результаты оценки влияния неоднородности, возникающей в результате кислотной обработки или гидроразрыва пласта, на разработку нефтяных залежей при их заводнении.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались:

на Российской конференции «Многофазные системы: природа, человек, общество, технологии», г. Уфа, июнь 2010;

на Всероссийской научной школе молодых ученых «Механика неоднородных жидкостей в полях внешних сил», г. Москва, декабрь 2010;

на Двенадцатом Всероссийском симпозиуме по прикладной и промышленной математике, г. Казань, апрель 2011;

на V международной научно-технической конференции «Математическое и компьютерное моделирование естественнонаучных и социальных проблем», г. Пенза, май 2011;

на итоговых конференциях ИММ КазНЦ РАН: г. Казань, февраль 2009г., февраль 2011г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано восемь работ, три из которых – в изданиях из перечня ВАК, одна – в трудах, приравненных к публикациям в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, двух разделов, заключения и списка литературы. Работа изложена на 100 страницах, содержит 51 рисунок. Список литературы состоит из 82 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы основные цели исследований и защищаемые положения, их научная новизна и практическая ценность работы.

В **первом** разделе в подразделе 1.1 дается краткий обзор исследований, близких по своей тематике к теме диссертации. В подразделе 1.2 приводится система уравнений двухфазной фильтрации несжимаемых несмешивающихся жидкостей с учетом капиллярных и гравитационных сил, которая включает в себя:

уравнения неразрывности

$$m \frac{\partial S_i}{\partial t} + \mathbf{div}(\mathbf{U}_i) = 0, \quad (i=o, w), \quad (1)$$

уравнения движения в виде обобщенного закона Дарси

$$\mathbf{U}_i = -k \frac{f_i}{\mu_i} \mathbf{grad}(P_i - \rho_i g z), \quad (i=o, w) \quad (2)$$

где  $m$  – пористость,  $k$  – абсолютная проницаемость,  $P_i$  – давление в фазах,  $\mu_i$  – динамическая вязкость,  $\mathbf{U}_i$  – скорость фильтрации  $i$ -ой фазы;  $S_i$  – насыщенность пористого тела  $i$ -ой фазой,  $f_i$  – функция относительной фазовой проницаемости,  $\rho_i$  – плотность фазы,  $g$  – ускорение свободного падения. Индексами « $w$ » и « $o$ » помечены величины, характеризующие смачивающую и несмачивающую фазы (далее индекс « $w$ » в обозначении насыщенности пласта смачивающей фазой будет опускаться, если это не приводит к путанице:  $S=S_w$ ).

Разность давлений в фазах принимается равной капиллярному давлению:  $P_o - P_w = P_c$ , где  $P_c = \chi \cos \theta \sqrt{m/k} J(S)$ ,  $\chi$  – коэффициент поверхностного натяжения,  $\theta$  – краевой угол смачивания,  $J(S)$  – безразмерная функция Леверетта. Насыщенности фаз удовлетворяют условию

$$S_o + S_w = 1. \quad (3)$$

В подразделе 1.3 формулируются задачи двухфазной фильтрации в переменных «давление-скорость-насыщенность»:

$$\mathbf{div}(\mathbf{U}) = 0, \quad (4)$$

$$\mathbf{U} = -K \mathbf{grad}(P_o - \rho_o g z) + K_w \mathbf{grad}(P_k), \quad (5)$$

$$m \frac{\partial S}{\partial t} + \mathbf{div}[F \mathbf{U} + F_{ow} \mathbf{grad}(P_k)] = 0, \quad (6)$$

В подразделе 1.4 формулируются задачи двухфазной фильтрации в переменных «скорость-насыщенность»:

$$\mathbf{div}(\mathbf{U}) = 0, \quad (7)$$

$$\mathbf{rot}(\mathbf{U} / K) = \mathbf{rot}(F \mathbf{grad}(P_k)), \quad (8)$$

$$m \frac{\partial S}{\partial t} + \mathbf{div}[F \mathbf{U} + F_{ow} \mathbf{grad}(P_k)] = 0. \quad (9)$$

В этих же подразделах приводятся системы уравнений двухфазной фильтрации без учета капиллярных и гравитационных сил в указанных выше формулировках. Описываются возможные постановки граничных условий.

Во **втором** разделе решается задача двухфазной фильтрации в постановке «давление-скорость-насыщенность». Для решения используется метод контрольных объемов. В пункте 2.1 подробно описана сетка, на которой интегрируются система уравнений. В качестве искоемых переменных выбраны давление и насыщенность в узлах сетки и нормальные составляющие суммарной скорости фильтрации в серединах сторон контрольных объемов. Для уравнений неразрывности суммарного потока и для насыщенности построены единые контрольные объемы с узлами сетки в их центрах. При аппроксимации закона Дарси контрольные объемы смещены на половину шага сетки по осям координат для соответствующих компонент скорости. При интегрировании уравнения для насыщенности использована схема WENO. Схема WENO включает в себя два шага. Первый шаг – реконструкция решения на границе контрольного объема. Слева и справа от границы реконструируется решение в виде полиномов второй степени. В результате реконструкции на границе между двумя соседними контрольными

объемами получается два решения. Второй шаг заключается в вычислении единственного потока на границе контрольного объема как решение задачи о «распаде разрыва». Описан алгоритм решения задачи.

В подразделе 2.2 приводятся результаты расчетов. В подразделе 2.2.1 рассмотрена задача о заводнении неоднородного пласта. Приведены исходные данные и численные результаты для кусочно-однородного пласта. Приведены поля суммарной скорости фильтрации и сделаны выводы о влиянии неоднородного включения в пласте на динамику отбора нефти. В подразделе 2.2.2 решена задача о заводнении слоистого нефтяного пласта, имеющем непроницаемую перемычку с проницаемыми «окнами». На этой задаче показано, каким образом происходит распределение остаточных запасов в сообщающихся слоистых нефтяных пластах различной проницаемости.

В **третьем** разделе решается задача двухфазной фильтрации в постановке «скорость-насыщенность». Для этого также используется метод контрольных объемов. В подразделе 3.1 подробно описана сетка, на которой интегрируются система уравнений. В качестве искомых переменных выбраны нормальные составляющие суммарной скорости фильтрации в серединах сторон ячеек значения насыщенности в центрах ячеек. Для уравнений неразрывности суммарного потока и для насыщенности в качестве контрольных объемов выбраны ячейки сетки. При аппроксимации уравнения с ротором скорости контрольные объемы смещены на половину шага сетки по осям координат. При интегрировании уравнения для насыщенности использована схема WENO третьего порядка. Приведен алгоритм решения задачи.

В подразделе 3.2 приведены результаты численных расчетов, выполнено сравнение с аналитическим решением, с экспериментальными данными и результатами расчетов других авторов.

В подразделе 3.2.1 решена одномерная задачи Баклея-Левеверетта. Эта задача является первой тестовой задачей для выбранного метода решения.



Приведены численные результаты для сеток различной размерности, проведено сравнение с аналитическим решением. Показано, что с измельчением сетки численное решение стремится к аналитическому.

В подразделе 3.2.2 рассмотрена задача о заводнении неоднородного пласта, которая была решена в переменных «давление-скорость-насыщенность» в разделе 2.2.1. Приведено сравнение неоднородного и однородного пластов и сравнение с результатами, полученными в постановке «давление-скорость-насыщенность».

В подразделе 3.2.3 Решена задача о проникновении загрязняющей жидкости в пласт имеющей непроницаемое включение, сформулированы начальные и граничные условия. Приведены результаты расчетов и выполнено сравнение с результатами расчетов аналогичной задачи другими авторами. Показано, что качественно результаты совпадают.

В подразделе 3.2.4 решена задача о проникновении загрязняющей жидкости в пласт, имеющей каскад непроницаемых включений. Приведены результаты расчетов для случая однородного пласта. Проанализированы особенности течения в однородном и неоднородном пластах.

В подразделе 3.2.5 решена задача о сегрегации двухфазной жидкости. Сформулированы начальные и граничные условия. Эта задача является второй тестовой задачей для выбранного метода решения задачи двухфазной фильтрации в переменных «скорость-насыщенность». Выполнено сравнение полученного решения с результатами, полученными аналитическим путем Бедриковецким П.Г., Мароном. В.И. (Известия РАН. МЖГ. – 1986, №2). Показано, что выбранный метод решения позволяет учесть все особенности фильтрации двухфазной жидкости под действием силы тяжести.

В подразделе 3.2.6 решена задача о капиллярно противоточной пропитке. Сформулированы начальные и граничные условия. Эта задача является третьей тестовой задачей для метода решения задачи двухфазной фильтрации в переменных «скорость-насыщенность». Выполнено сравнение полученного решения с аналитическими и численными результатами Д.

Kashchiev (SPE Journal, December 2003), которое показало, что выбранный метод позволяет хорошо моделировать влияние капиллярных сил.

В подразделе 3.2.7 решена задача о вытеснении нефти из составного пористого тела и осуществлено сравнение расчетов с результатами эксперимента R.A. Dawe (Transp. Porous Med., 2008. – Vol. 71.).

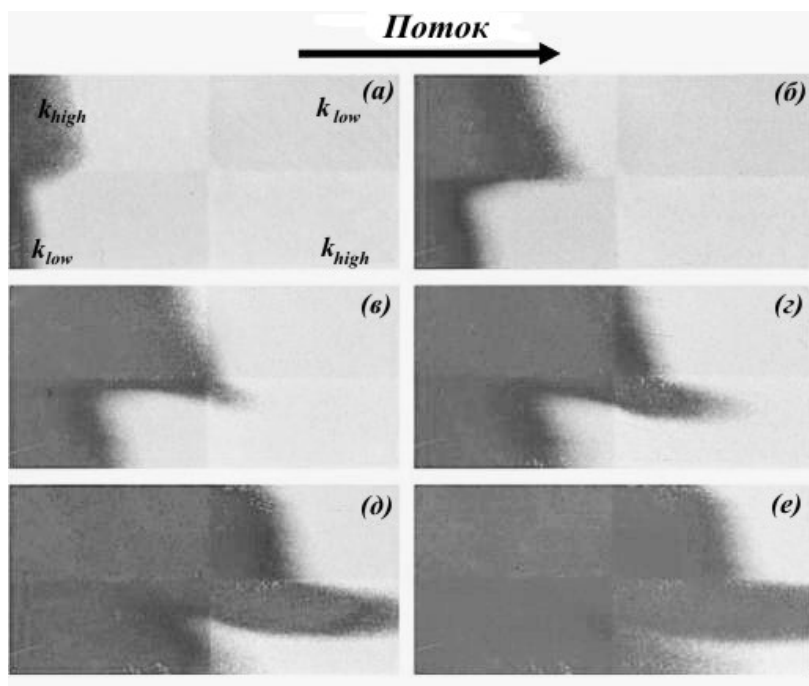


Рисунок 1. Распределение водонасыщенности в модели. Эксперимент [R.A. Dawe].

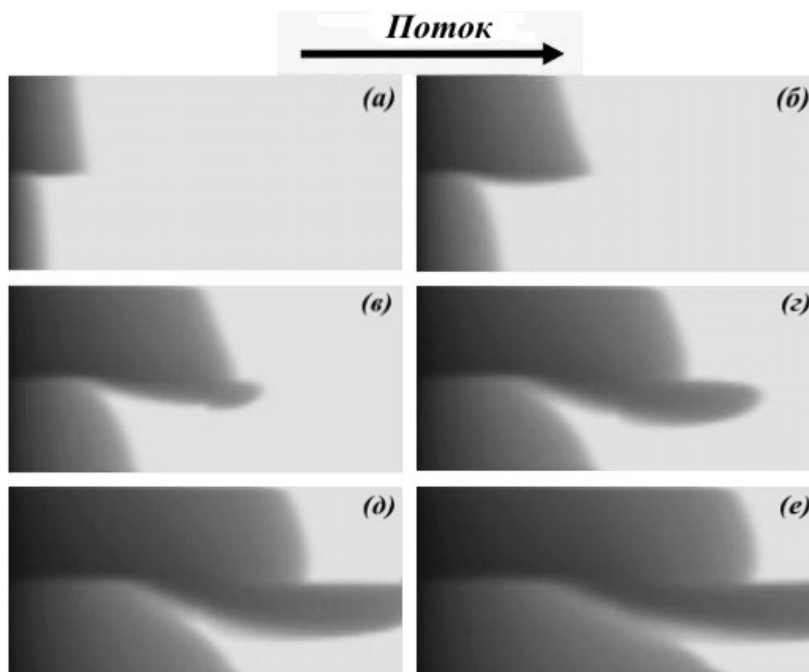


Рисунок 2. Распределение водонасыщенности в модели. Расчет.

Рисунок 3. Линии тока.  
Эксперимент [R.A. Dawe].

Рисунок 4. Поле скоростей. Расчет.

Эта задача является четвертой тестовой задачей. На рисунках 1 и 3 показаны результаты эксперимента, на рисунках 2 и 4 результаты расчетов. Из сравнения видно, что результаты расчетов удовлетворительно передали все особенности течения жидкости в эксперименте.

В подразделе 3.2.8 решена задача о гравитационном перераспределении жидкости в двухслойном нефтяном пласте, имеющем непроницаемую перемычку с проницаемыми «окнами». Эта задача решалась в три этапа.

На первом этапе решалась задача о вытеснении нефти водой – в пласт через левую границу нагнеталась вода и вычислялась обводненность продукции на выходе из пласта.

Второй этап: после достижения обводненности продукции 98% считалось, что все внешние границы пласта непроницаемы и решалась задача о гравитационном перераспределении жидкости в пласте.

Третий этап: после длительного простоя пласт вновь пускается в разработку и отключается при повторном достижении обводненности продукции 98%.

Результаты расчетов приведены на рис. 5. Сравниваются различные случаи: когда хорошо проницаемый пропласток находится в верхней части пласта, а плохо проницаемый – в нижней и наоборот. Показано, что распределения остаточных запасов в этих двух случаях сильно отличаются.

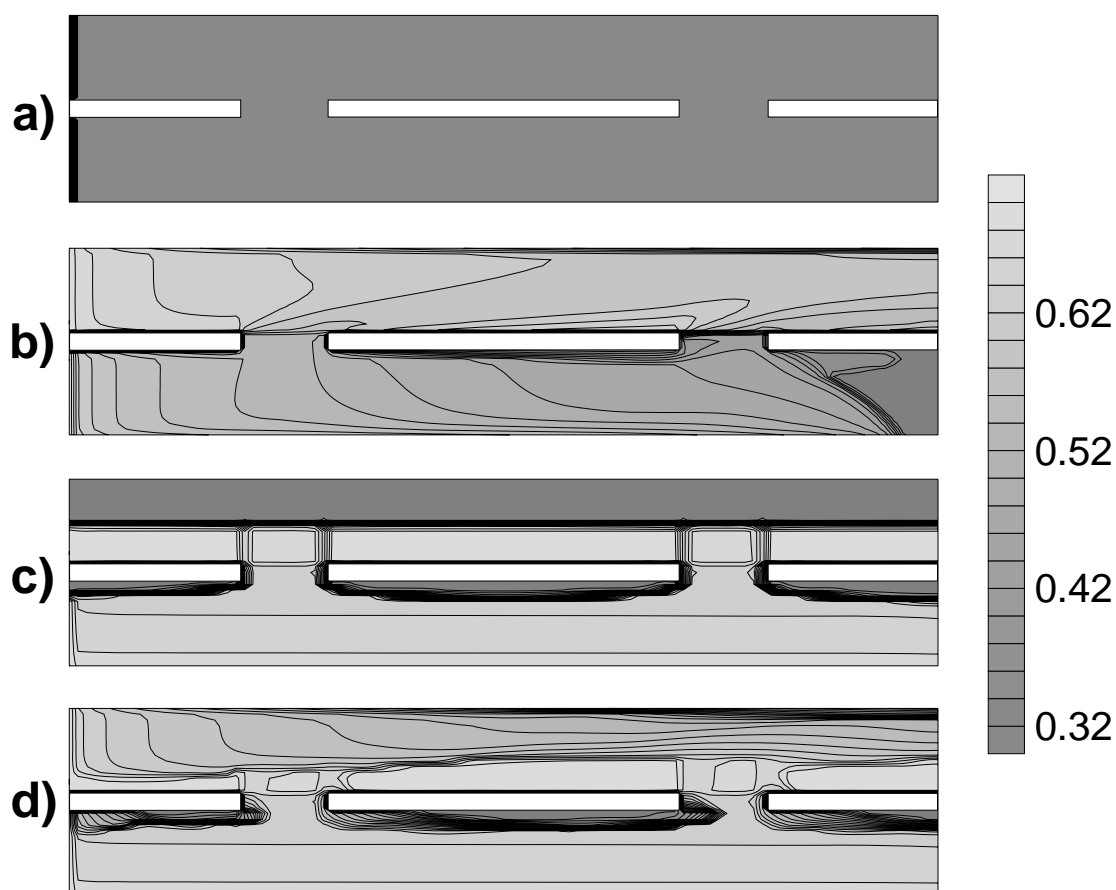


Рисунок. 5. Распределение водонасыщенности для различных моментов времени: а) начальное распределение водонасыщенности, б) момент достижения обводненности пласта 98%, в) после достижения 98% пласт находился в покое 30 лет, д) момент достижения вторичного обводнения пласта 98%.

Результаты представляют практический интерес и объясняют случаи появления нефти в выработанных продуктивных пластах, в которых при пуске залежи в разработку после длительного простоя происходит снижение обводненности продукции.

В подразделе 3.2.9 решена задача о заводнении однородного пласта и неоднородного пласта, имеющего высокопроницаемые включения. Исследуется влияние хорошо проницаемых включений на динамику отбора жидкости. Показано, что накопленная добыча нефти в обоих случаях практически совпадает, но при этом сильно отличается накопленная добыча попутной воды и время разработки. При наличии высокопроницаемых включений время разработки и накопленная добыча попутной воды сильно возрастают.

В подразделе 3.2.10 смоделировано течение двухфазной жидкости в элементе пятиточечной системы заводнения после глубокой кислотной обработки пласта. Показано, что последствия неравномерного изменения проницаемости в окрестности нагнетательной скважины сказываются на протяжении всей разработки залежи.

В подразделе 3.2.11 также исследуются последствия глубокой кислотной обработки. Показано, что при образовании в однородном пласте хорошо проницаемых зон возрастает неравномерность фронта вытеснения, что может приводить формированию целиков нефти в пласте, к ускоренному прорыву воды в добывающие скважины и к увеличению объема попутно добываемой воды.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. Разработаны методы численного решения задач двухфазной фильтрации несмешивающихся несжимаемых жидкостей в переменных «давление-скорость-насыщенность» и «скорость-насыщенность». И в том, и в другом случае реализован метод контрольных объемов на разнесенной сетке с применением схемы WENO к уравнению для насыщенности. Выполнено тестирование методов.
2. Расчетами показано, что по сравнению с однородными залежами наличие высокопроницаемых включений в нефтяных пластах приводит к увеличению продолжительности их разработки и к увеличению объема попутно добываемой воды при одинаковом конечном коэффициенте извлечения нефти.
3. Выявлено, что при наличии литологических «окон» между пропластками в многослойных пластах на распределение остаточных запасов нефти влияет взаимоположение хорошо и плохо проницаемых пропластков. Показано, что в случае верхнего расположения плохо проницаемого пропластка отключение хорошо проницаемого пропластка позволяет получить большую дополнительную добычу нефти по сравнению с обратным расположением

пропластков. Однако при пуске обводненной залежи в разработку после длительного простоя, коэффициент извлечения нефти выше в случае верхнего расположения хорошо проницаемого пропластка.

4. На модельных примерах показано, что мероприятия по увеличению проницаемости нефтяных пластов в прискважинной зоне (кислотная обработка, гидроразрыв пласта) наряду с увеличением темпа отбора жидкости могут привести к появлению целиков нефти вблизи галереи нагнетательных скважин и к снижению конечного коэффициента извлечения нефти.

## **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**

### **В рецензируемых журналах из перечня ВАК:**

1. *Никифоров Г.А.* Применение метода контрольных объёмов для решения задач двухфазной фильтрации в переменных “скорость-насыщенность” // Вычислительные методы и программирование. – 2006. – Т. 7. – С. 96-100.
2. *Никифоров Г.А.* Моделирование двухфазной фильтрации в переменных “скорость-насыщенность” // Вычислительная механика сплошных сред. – 2010. – Т. 3, №2. – С. 83-92.
3. *Газизов А.Ш., Газизов А.А., Никифоров А.И., Никифоров Г.А., Муслимов Р.Х. Бахтеев Р.Х.* Научно-технические основы создания энергосберегающих технологий для наращивания ресурсной углеводородной базы нефтеотдачи пластов. // Нефтепромысловое дело. – 2010. – №4. – С 10-21.

### **В изданиях, приравненных к публикациям в ведущих рецензируемых научных журналах:**

4. *Никифоров Г.А.* О гравитационном перераспределении жидкости в слоистых нефтяных пластах // Математическое и компьютерное моделирование естественнонаучных и социальных проблем. Сб. статей V международной научно-технической конференции молодых

специалистов, аспирантов и студентов. – Пенза: Приволжский дом знаний, 2011. – С. 101-104.

**В прочих изданиях:**

5. *Д.А. Губайдуллин, Г.А. Никифоров. Численное моделирование двухфазной фильтрации в переменных “скорость-насыщенность”* // Российская конференция «Многофазные системы: природа, человек, общество, технологии», г. Уфа, 21-25 июня 2010. – С. 97.
6. *Губайдуллин Д.А., Садовников Р.В., Никифоров Г.А. Решение задач о растекании загрязнения в пористой среде в переменных “скорость-насыщенность”* // Всероссийская научная школа молодых ученых «механика неоднородных жидкостей в полях внешних сил», сб. тезисов докладов, г. Москва, 30 ноября – 2 декабря 2010. – С. 33.
7. *Губайдуллин Д.А., Садовников Р.В., Никифоров Г.А. Численное моделирование двухфазной фильтрации в переменных скорость-насыщенность* // Актуальные проблемы механики сплошной среды. К 20-летию ИММ КазНЦ РАН. Т. II. – Казань: Фолиант, 2011. – С 161-180.
8. *Никифоров Г.А. Гравитационная сегрегация двухфазной жидкости в сообщающихся нефтяных пластах.* // Обзорение прикладной и промышленной математики. Т. 18, – Вып. 1, – 2011 – С. 132.